

클러터 환경에서 다중센서 정보융합을 통한 유도성능 개선 연구

A Study of Missile Guidance Performance Enhancement using Multi-sensor Data Fusion in a Cluttered Environment

한 두 희*, 김 형 원, 송 택 렬
(Du-Hee Han, Hyoung-Won Kim, and Taek-Lyul Song)

Abstract: A MTG (Multimode Tracking and Guidance) system is employed to compensate for the limitations of individual seekers such as RF (Radio Frequency) or IIR (Imaging Infra-red) and to improve the overall tracking and guidance performance in jamming, clutter, and adverse weather environments. In the MTG system, tracking filter, data association, and data fusion methods are important elements to maximize the effectiveness of precision homing missile guidance. This paper proposes the formulation of a Kalman filter for the estimation of line-of-sight rate from seeker measurements in missiles guided by proportional navigation. Also, we suggest the HPDA (Highest Probability Data Association) and data fusion methods of the MTG system for target tracking in the adverse environments. Mont-Carlo simulation is employed to evaluate the overall tracking performance and guidance accuracy.

Keywords: HPDAF (Highest Probability Data Association Filter), RF (Radio Frequency) seeker, IIR (Imaging Infra-red) seeker, data fusion, data association, PNG (Proportional Navigation Guidance)

I. 서론

유도탄이란 자신과 표적에 대해 획득된 상대 정보를 가지고 유도명령을 실시간으로 계산하여 비행경로를 수정 제어함으로써 궁극적으로 표적을 명중시킬 수 있도록 설계된 무인 비행체이다. 유도탄의 유도방식은 지령유도(command guidance), 호밍유도(homing guidance), 프로그램유도(program guidance)로 분류할 수 있다. 여기서 호밍유도의 경우 표적은 유도탄내의 탐색기에 의해 감지, 추적이 되며 복잡하고 비싼 유도탄 가격, 사거리에 관계없이 유도 정확도 유지, 다표적 대응능력이 좋음, 감지거리 제한성(날씨에 영향받음)등의 특징을 갖는다. 이러한 호밍유도에 대해 다양한 유도법칙에 대해서 여러 방법들이 연구되어 있으며, 대표적으로 실제 유도탄에 많이 적용된 방식으로는 비례항법유도(PNG : Proportional Navigation Guidance)기법이 있다. 비례항법유도법칙은 탐색기로부터 획득된 표적시선의 변화율에 비례하는 가속도 명령을 사용하는 방법으로서 2-point guidance라고도 불리며 매우 효과적인 유도법칙으로 널리 사용되고 있으며 국내에서도 많은 연구가 수행되어 왔다 [1-6].

유도탄이 표적을 효과적으로 요격하기 위해서는 표적에 대한 정확한 정보가 요구된다. 탐색기로부터 획득된 표적에 대한 정보를 이용하여 표적의 위치, 속도, 가속도를 추정하기 위해 추적 필터가 사용되며 추적 필터를 구성하기 위해서는 표적의 운동을 표현할 수 있는 동력학모델이 필요하다[7]. 추적 필터에 대한 연구로는 고속 고기동 표적 및 다

중표적 추적에 이르는 다양한 기법들이 소개되어왔다[8,9]. 호밍 유도탄의 수동형 탐색기를 통해 획득된 각도 정보만을 이용한 추적 필터링 기법 및 각도정보만을 이용하여 표적 추적이 가능한가에 대한 가관측성 해석에 대한 연구도 수행되었다[10,11]. 추적 시스템이 동작하는 작동 환경에 따라 실제 표적의 출력 외에 클러터와 같은 거짓 표적이 센서에 의해 측정되거나 다른 필터에 의해 추적 중인 다른 표적의 출력이 동시에 측정될 때와 같이 다중표적 상황에서는 많은 측정치 중에서 실제 표적의 출력을 찾아내어 상태변수를 쇄신시키는 자료결합(data association) 과정이 필수적으로 소요된다[12].

호밍유도에 주로 사용되는 탐색기는 일반적으로 표적을 탐색하고 포착(lock-on)후 표적이 IFOV (Instant Field Of View)내부에 존재하도록 탐색기의 boresight를 제어해 준다. 탐색기의 종류는 초고주파(RF), 레이저(laser), 적외선영상(IIR) 센서등이 있다. 능동호밍에 사용되는 초고주파 탐색기의 경우 유도에 필요한 표적과 탄의 상대위치, 상대속도를 얻을 수 있으나 각도식별 능력이 떨어진다. 수동호밍에 주로 사용되는 적외선영상 탐색기의 경우 표적의 각도추적 능력이 높다. 반면에 각도정보만을 획득하며 표적인식 거리가 표적의 신호 특성과 기후에 민감한 단점이 있다[13].

현대전에 있어서 병력이나 화력에 의존하는 전투력은 큰 의미가 없어졌으며 무기의 고정밀/고성능화를 통한 질적 강화로 미래의 전장 환경에서 정밀 타격 유도무기의 역할이 커져가고 있다. 표적의 지능화/고기동화와 적의 전자방해/광학방해가 존재하는 전장 환경에서 각각의 탐색기가 갖는 장단점을 보완하여 전천후 사용이 가능하며, 표적에 대한 유도무기의 대응능력을 극대화시킬 수 있는 다중 탐색기를 장착한 유도탄의 개발이 요구되고 있으며, 선진국뿐만 아니라 개발도상국과 후진국에서도 첨단화와 다양화에 박차를

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 10. 19., 수정: 2009. 11. 23., 채택확정: 2009. 12. 17.
한두희, 김형원, 송택렬: 한양대학교 전자전기제어계측공학과
(hduhee@hanyang.ac.kr/khwhy8858@naver.com/tsong@hanyang.ac.kr)

※ 이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-511-D00085).

가하고 있다. 이와 관련하여 본 논문에서는 다중 센서정보로부터 추출된 표적신호를 효과적으로 융합하고 비우호적인 추적환경에서 표적추적의 정밀도를 개선시키고, 트랙 수명을 길게 하며 현대 유도법칙이 필요로 하는 유도매개변수를 추정하여 표적요격성능을 개선하기 위한 MTG 기법을 제안하고자 한다. 이를 위해 surface 표적을 타격 대상으로 유도탄에 적용이 가능한 추적필터 및 고밀도 클러터 환경에서 표적의 거리와 신호세기 정보를 이용한 자료결합기법, RF/IIR 탐색기로부터 획득된 표적정보를 효과적으로 융합할 수 있는 정보융합기법을 제시하고 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 표적추적 및 유도에 대한 성능분석을 수행하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 RF/IIR 탐색기의 측정정보를 이용한 표적의 시선각속도추정을 위한 필터구조 및 비례항법유도기법을 적용하기 위해 필요한 유도변수 추정에 대해서 다룬다. III 장에서는 II 장에서 제안된 추적필터구조 및 유도변수추정 방법을 이용하여 클러터 환경에서 정보융합 및 자료결합기법을 연계한 추적필터구조를 제시하고, IV 장에서는 모의실험을 통해 제안된 MTG 기법의 성능에 대해 고찰해본다.

II. 시선각속도 추정을 위한 추적필터 설계

추적필터의 사용환경은 시스템의 불확실성이 존재하기 때문에 필터는 확률이론을 사용하여 개발하게 된다. 유도탄에 사용되는 추적필터 알고리즘은 간단하면서도 실시간 연산이 가능하여야 한다. 또한 유도에 필요한 매개변수 추정 성능이 중요하며 신뢰성이 보장되어야 한다. 여기서는 RF/IIR 탐색기로부터 획득되는 측정치의 특성을 고려하여 다이내믹 필터의 대명사로 되어있는 칼만필터[14]를 적용하여 비례항법유도에 필요한 시선각속도를 추정하고 유도탄의 표적요격 상황을 모델링하여 시뮬레이터를 구성하고 유도성능을 살펴보고자 한다.

1. 좌표계 설정

유도탄 및 표적의 운동, 탐색기 모델을 이용하여 유도탄의 표적요격 상황을 묘사하기 위해서는 관성좌표계(inertial frame, {I}), 유도탄의 동체좌표계(body frame, {B}), 탐색기의 김발좌표계(seeker gimbal frame, {SG}), 시선좌표계(line-of-sight frame, {LOS})등이 필요하다. 관성좌표계는 3차원 공간상에서 고정되어있는 직교좌표계로서 유도탄 및 표적의 운동을 설명하는데 근본이 되는 Newton의 제2법칙이 이 좌표계에서 성립하기 때문에 동역학과 관련된 다양한 문제에서는 항상 정의되는 좌표계이다. 관성좌표계의 각 축의 방향은 시나리오가 시작되는 순간에 NED (North, East, Down)방향을 향하는 것으로 가정한다. 동체좌표계의 원점은 유도탄의 무게중심에 위치하며, 관성좌표계에 대해 yaw, pitch, roll 순서로 각각 ψ, θ, ϕ 만큼 회전시켜 얻어진다. X_B 축은 유도탄의 동체 중심축(fuselage center line)을 지나며 코(nose)방향을 향한다. Y_B 축은 탄의 yaw 평면의 X_B 에 우향 수직 방향이며 Z_B 축은 오른손 법칙에 의해 정의된다. 김발형 탐색기의 좌표계는 관성좌표계에 대해 yaw, pitch 순서로 각각 ψ_g 와 θ_g 에 의해 회전시켜 정의되며 표적 포착

후에는 X_{sg} 축이 boresight 방향을 향한다. 김발좌표계는 시선좌표계를 기준으로 각각 yaw, pitch 순서로 추적오차각(boresight error angles) ϵ_ψ 와 ϵ_θ 만큼 틀어진 방향을 향한다. 고정형(strapdown) 탐색기의 경우 탐색기 boresight가 유도탄의 동체 중심축과 일치하게 고정되어 있어 김발좌표계가 필요 없다. 시선좌표계는 관성좌표계에 대해 yaw, pitch 순서로 각각 시선각 $\lambda_\psi, \lambda_\theta$ 순서로 회전시켜 정의되며, 유도탄에서 표적을 잇는 선을 X_{LOS} 축으로 하며 비례항법유도명령을 계산하는 좌표계가 된다.

각 좌표계사이의 변환관계는 오일러 각에 의해 정의되며, 각 축의 회전행렬을 R_X, R_Y, R_Z 로 정의한다. 또한 A좌표계에서 B좌표계로의 좌표변환행렬은 C_A^B 표현한다. 다음은 좌표계 사이의 변환행렬을 각 축별 회전행렬로 나타낸 것이다[15].

$$\begin{aligned} C_I^B &= R_X(\phi)R_Y(\theta)R_Z(\psi) \\ C_I^{SG} &= R_Y(\theta_g)R_Z(\psi_g) \\ C_{SG}^{LOS} &= R_Y(\epsilon_\theta)R_Z(\epsilon_\psi) \\ C_I^{LOS} &= C_{SG}^{LOS}C_I^{SG} = R_Y(\lambda_\theta)R_Z(\lambda_\psi) \end{aligned} \tag{1}$$

2. 탐색기 모델

대상표적으로 유도탄을 호밍하는 경우 보통 2축 김발(2-axis gimbal)을 장착한 탐색기를 많이 사용한다. 탐색기는 표적 정보를 얻기 위한 매체의 송수신 및 자료처리 부분과 김발 운동을 적절히 제어하는 부분으로 구성된다. 탐색기의 김발 운동 제어부는 탐색기가 항상 표적을 지향할 수 있도록 시선각추종루프(LOS angle tracking loop)를 구성한다. 추적오차각 ϵ_θ 와 ϵ_ψ 는 시선각추종루프와 radome refraction의 영향으로 발생하며, 여기서는 radome refraction의 영향을 고려하지 않고 탐색기 모델을 간단한 2차 전달함수(transfer function)로 가정하였다[13].

3. 추적필터설계

유도탄의 호밍 유도 알고리즘을 구현하기 위해서 그림 1의 2축 김발형 탐색기로부터 얻어지는 추적오차각정보를 이용하여 시선각속도를 추정하기 위한 칼만필터를 설계하고자 한다. 능동형 초고주파 탐색기의 경우에는 김발좌표계상에서 표적과 탄사이의 상대거리와 추적오차각이 측정될 수 있으며, 수동형 적외선영상탐색기의 경우에는 추적오차각만 측정되는 것으로 한다. 본 장에서는 RF 또는 IIR 단일 탐색기만을 사용했을 경우에 대해 시선각속도를 추정하기 위한 필터를 설계하고자 하며, 두 개의 탐색기를 동시에 사

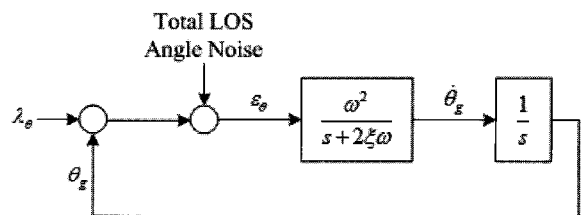


그림 1. Radome의 영향이 생략된 탐색기 구조. Fig. 1. Seeker block diagram without radome effect.

용했을 경우 필터구조에 대해서는 III 장에서 다시 논의하고자 한다.

3.1 RF 탐색기 측정치를 이용한 칼만필터 설계

표적추적필터를 구성하기 위해서는 표적의 동역학 모델이 필요하며, surface 표적의 경우 저속/저기동의 특징을 가지므로 등가속도모델을 적용하여 칼만필터를 구성한다. 필터의 상태변수는 원점이 유도탄에 위치하며 각 축이 NED 방향을 향하는 항법좌표계(navigation frame, {N}) 상에서의 상대위치, 상대속도, 표적의 가속도로 정의한다. 호밍단계에서의 표적과 탄의 거리는 탐색기의 탐지거리내에 존재하기 때문에 표적 추적이 이루어지는 항법좌표계의 방향은 항상 일정하며, 앞에서 정의한 관성좌표계와 같은 방향으로 가정한다. 다음은 이산시간 상태방정식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} X_k &= \phi(t_k, t_{k-1})X_{k-1} + Gw_k - BU_k \\ z_k &= HX_k + v_k \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, X_k 는 표적의 상태변수이며, w_k 는 표적의 동역학 모델과 실제 표적 모델간의 차이를 잡음으로 모델링한 공정잡음(process noise)이다. z_k 는 탐색기를 통한 측정치의 출력을 나타내며, v_k 는 측정잡음(measurement noise)을 나타낸다. 공정잡음 w_k 는 평균이 0이고, 공분산이 Q_k 인 백색 가우시안 잡음이고, 측정잡음 v_k 는 평균이 0이고, 공분산이 R_k 인 백색가우시안 잡음으로 가정한다. 다음은 식 (2)의 시스템행렬과 각 잡음의 공분산행렬을 나타낸다. I_3 와 O_3 는 각각 3×3 단위행렬과 영행렬을 의미하며, T 는 샘플링주기이고 위 첨자 t 는 전치행렬을 의미한다.

$$\begin{aligned} \phi(t_k, t_{k-1}) &= \begin{bmatrix} I_3 & TI_3 & T^2/2I_3 \\ 0 & I_3 & TI_3 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} T^2/2I_3 \\ TI_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \\ H &= [I_3 \ O_3 \ O_3] \\ Q_k &= cov(Gw_k) = var(w_k)GG^t \\ R_k &= C_{SG}^N J \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\psi^2 \end{bmatrix} J^t C_{SG}^{N'} \\ J &= \begin{bmatrix} \partial x/\partial r & \partial x/\partial \theta & \partial x/\partial \psi \\ \partial y/\partial r & \partial y/\partial \theta & \partial y/\partial \psi \\ \partial z/\partial r & \partial z/\partial \theta & \partial z/\partial \psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

탐색기로부터의 측정치는 극좌표계 형태로 표시되며, 추적필터의 상태변수는 직교좌표계 형태이다. 측정잡음이 [16]에서 제시한 조건을 만족할 경우 간단한 변환 측정치를(converted measurement) 이용하여 측정치를 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_{mea} \\ y_{mea} \\ z_{mea} \end{bmatrix}^{\{N\}} = C_{SG}^N \begin{bmatrix} r_{mea} \cos \epsilon_\theta \cos \epsilon_\psi \\ r_{mea} \cos \epsilon_\theta \sin \epsilon_\psi \\ -r_{mea} \sin \epsilon_\theta \end{bmatrix}^{\{SG\}} \quad (4)$$

위 첨자 {N}과 {SG}는 좌표계를 의미함.

변환 측정치를 사용할 경우 식 (3)에서 R_k 를 구하기 위해서는 jacobian 행렬이 필요하다[17]. Jacobian 행렬을 계산할 때는 쇠신단계(update step)에서 칼만이득과 측정잔차(residual)사이 발생되는 correlation에 의한 바이어스를 줄이기 위해 예측된 값을 사용하여 계산한다. 또한 측정치가 획득되는 김발좌표계와 표적추적이 이루어지는 항법좌표계 사이의 변환행렬이 필요하다. 다음은 칼만필터의 쇠신단계를 나타낸다. 여기서, I_9 는 9×9 단위행렬이다.

$$\begin{aligned} \text{쇠신단계} \\ K_k &= \bar{P}_k H^t (H \bar{P}_k H^t + R_k)^{-1} \\ \hat{X}_k &= \bar{X}_k + K_k (z_k - H \bar{X}_k) \\ \hat{P}_k &= (I_9 - K_k H) \bar{P}_k (I_9 - K_k H)^t + K_k R_k K_k^t \end{aligned} \quad (5)$$

예측단계(prediction step)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{예측단계} \\ \bar{X}_{k+1} &= \phi(t_{k+1}, t_k) \hat{X}_k - BU_k \\ \bar{P}_{k+1} &= \phi(t_{k+1}, t_k) \hat{P}_k \phi(t_{k+1}, t_k)^t + Q_k \end{aligned} \quad (6)$$

위 식 (6)에서 BU_k 는 유도탄의 기동을 고려하여 추적필터의 예측값을 보정하기 위한 값이다. U_k 는 유도탄의 가속도벡터 값으로 추적이 이루어지는 항법좌표계로 변환한 값이다. B 는 다음과 같다.

$$B = \begin{bmatrix} T^2/2I_3 \\ TI_3 \\ O_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

RF 탐색기를 이용하여 유도탄에서 본 표적의 상대거리와 속도를 추정하는 간단한 필터 구조를 소개하였으며, 추정된 표적정보를 이용하여 비례항법유도 명령 계산에 필요한 시선각속도 값을 계산할 수 있다[18]. 고정형 RF 탐색기일 경우에는 유도탄의 동체좌표계상에서 표적을 바라본 거리와 각도정보(look angles)가 측정되며, look angles의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{R}_{TM}^{\{I\}} &= \vec{R}_{Target}^{\{I\}} - \vec{R}_{Missile}^{\{I\}} \\ \vec{R}_{TM}^{\{B\}} &= C_I^B \vec{R}_{TM}^{\{I\}} = [x \ y \ z]^{\{B\}'} \\ \text{유도탄에서 본 거리와 look angles} \\ R &= |\vec{R}_{TM}^{\{B\}}| \\ \theta_{look\ angle} &= \tan^{-1} \frac{-z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \psi_{look\ angle} &= \tan^{-1} \frac{y}{x} \end{aligned} \quad (8)$$

고정형 탐색기일 경우 식 (3), (4)의 좌표변환행렬을 C_{SG}^N 에서 C_B^N 로 하며, 식 (4)의 우변에서 표적에 대한 거리 정보가 김발좌표계가 아닌 동체좌표계상에서 계산된다. 필터구조는 동일하게 사용함으로써 표적의 상태변수를 추정할 수 있다.

3.2 IIR 탐색기 측정치를 이용한 칼만필터 설계

수동형 IIR 탐색기의 측정치는 추적오차값이 유일하다. RF 탐색기와는 달리 IIR 탐색기의 경우에는 필터의 상태변수를 관성좌표계에 대한 시선각과 시선각속도 값으로 하고,

그림 1에서 보듯이 필터의 시선각 측정치는 추적오차각과 김발각의 합으로 볼 수 있다. 추적필터의 표적 동역학 모델은 등속도 모델로 하였으며, 상태변수가 시선각과 시선각속도로만 구성되었기 때문에 식 (2), (6)에 있는 유도탄의 기동에 의한 예측치의 보상은 하지 않았다. 추적필터의 이산 시간 시스템 상태방정식은 식 (2)에서 BU_k 가 생략된 형태와 동일하며 시스템 및 각 잡음의 공분산 행렬은 다음과 같다. 여기서, I_2 와 O_2 는 2×2 단위행렬과 영행렬을 의미한다.

$$\begin{aligned} \phi(t_k, t_{k-1}) &= \begin{bmatrix} I_2 & TI_2 \\ O_2 & I_2 \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} T^2/2I_2 \\ TI_2 \end{bmatrix} \\ H &= [I_2 \ O_2] \\ Q_k &= cov(Gw_k) = var(w_k)GG^T \\ R_k &= \begin{bmatrix} \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\psi^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{9}$$

IIR 탐색기의 경우에는 유도탄에 대한 표적의 상대속도 값을 추정하지 못한다. 비례항법유도기법에 의한 유도명령을 계산하기 위해서는 상대속도가 필요하다, surface 표적은 유도탄에 비해 상대적으로 매우 작은 속도로 움직이기 때문에 유도명령계산에서는 유도탄의 속도값을 사용해도 유도오차가 크게 유발되지 않을 것으로 사료된다.

고정형 IIR 탐색기를 사용할 경우에는 동체좌표계상에서 표적의 각도정보가 측정된다. 이 경우 비례항법유도법칙을 사용하기 위해 시선각속도추정을 함에 있어 look angle rates과 유도탄의 body rates를 이용할 경우 parasite loop 문제가 존재하여 유도탄이 불필요한 기동을 하거나 탐색기의 표적 lock-on 상태가 해제될 가능성이 높다[19]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 본 논문에서 제시한 형태로 추적필터의 상태변수를 시선각과 시선각속도로 하여 필터를 설계하고 측정치는 유도탄의 자세정보와 look angles정보를 이용하여 계산함으로써 시선각속도추정을 할 수 있다.

4. 비례항법유도기법

비례항법유도법칙은 탐색기를 통해 추정된 표적 시선의 변화율에 비례하는 가속도 명령을 발생한다. 비례항법유도법칙에서 시선각속도와 유도탄의 회전각속도의 비를 항법계수(navigation constant) a 라 표기한다. 일반적으로 a 는 1보다 크며 2~6사이의 값을 취한다. 이러한 항법계수 a 는 유도탄이 시선보다 더 빨리 유도명령에 의해 회전함을 의미하며 따라서 유도탄은 시선에 대해 선도각(lead angle)을 갖게 됨을 알 수 있다. 일반적으로 항법계수는 탐색기의 성능이 우수할 경우 크게 설정할 수 있으며, 유도탄 및 표적의 기동능력 등에 따라 적절한 값을 적용하여 사용한다. 본 논문에서는 유도탄에서 본 표적의 시선에 수직인 가속도 명령을 계산하는 방법인 'True PNG' 방법을 적용하고자 하며 다음은 위에서 제시한 각각의 탐색기별 추적 필터에서 추정된 표적의 상태정보를 이용하여 계산된 시선에 수직인 가속도 명령에 대해서 살펴보았다[18].

4.1 RF 탐색기 추정치를 이용한 유도명령 계산

RF 탐색기를 이용하여 설계한 추적필터에서 추정된 표적의 상태변수는 항법좌표계상에서의 좌표값으로서 유도탄에 대한 표적의 상대위치와 상대속도로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{R}_{TM}^{(N)} &= [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z}]^{(N)^t} \\ \vec{R}_{TM}^{(N)} &= [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z}]^{(N)^t} \end{aligned} \tag{10}$$

위 식 (10)의 추정값을 이용하여 항법좌표계와 시선좌표계사이의 오일러각을 정의한다.

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_\theta &= \tan^{-1} \frac{-\hat{z}}{\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}} \\ \hat{\lambda}_\psi &= \tan^{-1} \frac{\hat{y}}{\hat{x}} \end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)의 오일러 각을 이용하여 시선좌표계와 항법좌표계사이의 좌표변환행렬 C_N^{LOS} 를 계산할 수 있다. 시선좌표계 상에서 시선각속도를 계산하기 위해 식 (10)의 추정치를 시선좌표계상의 값으로 변환한다.

$$\begin{aligned} \vec{R}_{TM}^{(LOS)} &= C_N^{LOS} \vec{R}_{TM}^{(N)} \\ \vec{R}_{TM}^{(LOS)} &= C_N^{LOS} \vec{R}_{TM}^{(N)} \end{aligned} \tag{12}$$

식 (12)의 값을 이용하여 시선좌표계상에서의 시선각속도 벡터를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\vec{\lambda}^{(LOS)} = \frac{\vec{R}_{TM}^{(LOS)} \times \dot{\vec{R}}_{TM}^{(LOS)}}{|\vec{R}_{TM}^{(LOS)}|} \tag{13}$$

시선좌표계상에서 유도명령을 계산하기 위해서는 $\vec{V}_C^{(LOS)}$ (closing velocity)가 필요하다.

$$\vec{V}_C^{(LOS)} = -\dot{\vec{R}}_{TM}^{(LOS)} \tag{14}$$

식 (13), (14)와 항법계수 a 를 이용하여 3차원 공간상에서의 가속도 명령을 다음과 같이 계산할 수 있다. 일반적으로 $a=3$ 의 값을 사용한다.

$$\vec{A}_{com}^{(LOS)} = a \vec{\lambda}^{(LOS)} \times \vec{V}_C^{(LOS)} \tag{15}$$

식 (15)와 같이 시선좌표계상에서 유도명령을 계산하면 시선좌표계의 YZ 평면상에서의 유도명령 값이 계산되며 X축으로는 영의 값을 갖는다. 실제 가속도명령은 동체좌표계상에서 표현되어야 하기 때문에 시선좌표계와 동체좌표계 사이의 오일러각이 필요하다. 이 각은 식 (8)에서 계산된 look angles과 같다. 다음은 동체좌표계상에서의 가속도 명령이다.

$$\begin{aligned} A_{Y_B} &= \frac{A_{Y_{LOS}}}{\cos \psi_{look\ angle}} \\ A_{Z_B} &= \frac{A_{Z_{LOS}}}{\cos \theta_{look\ angle}} \end{aligned} \tag{16}$$

4.2 IIR 탐색기 추정치를 이용한 유도명령 계산

IIR 탐색기의 측정치를 이용하여 설계한 추적필터의 상태변수는 시선각과 시선각속도이기 때문에 RF 탐색기의 경우보다는 간단하게 유도명령을 계산할 수 있다. 시선각은 추정치값을 그대로 사용하며 시선좌표계상에서의 시선각속도 추정값은 다음과 같다.

$$\vec{\lambda}^{\{LOS\}} = \begin{bmatrix} -\hat{\lambda}_\psi \sin \hat{\lambda}_\theta \\ \hat{\lambda}_\theta \\ \hat{\lambda}_\psi \cos \hat{\lambda}_\theta \end{bmatrix}^{\{LOS\}} \quad (17)$$

추정된 시선각속도의 값은 오일러 각속도이기 때문에 위와 같이 시선좌표계상에서의 값으로 변환하여 유도명령 계산에 사용한다. 접근속도는 유도탄의 속도로 가정하여 계산한다.

$$\vec{V}_C^{\{LOS\}} = C_B^{LOS} \vec{V}_M^{\{B\}} \quad (18)$$

위에서 $\vec{V}_M^{\{B\}}$ 는 동체좌표계 상에서의 유도탄의 속도이며, C_B^{LOS} 는 추정된 시선각도정보를 이용한 좌표변환행렬 C_N^{LOS} 와 유도탄의 INS (Inertial Navigation System)의 자세정보를 통해 계산이 가능한 C_N^B 를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$C_B^{LOS} = C_N^{LOS} C_N^B \quad (19)$$

유도명령은 식 (15), (16)과 동일한 방법으로 계산이 가능하다. 특히 식 (16)에서 필요한 look angles 정보는 좌표변환행렬 C_B^{LOS} 를 이용하여 계산이 가능하다.

5. 시뮬레이션을 통한 추정성능 및 유도성능 분석

본 절에서는 유도탄의 표적요격 상황을 묘사할 수 있는 시뮬레이터를 구성하여 위에서 제시한 추적필터와 유도성능에 대한 분석을 수행하고자 한다. 유도탄 및 표적은 질점

표 1. 유도탄 및 탐색기 파라미터 값 정의.

Table 1. The parameters of the missile and seekers.

구분	파라미터 값	
유도탄 속도	250[m/sec]	
자동조종장치	$\frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$	
	$\omega = 20[\text{rad}/\text{sec}]$	
	$\zeta = 0.707$	
탐색기	$\omega = 15[\text{rad}/\text{sec}]$	
	$\zeta = 0.707$	
	RF 탐색기 측정잡음, 1σ	
	σ_r	5[m]
	σ_θ	0.5[deg]
	σ_ψ	0.5[deg]
	IIR 탐색기 측정잡음, 1σ	
	σ_θ	0.06[deg]
σ_ψ	0.06[deg]	
가속도 제한	3g	

표 2. 추적필터의 기동가속도 편차와 샘플링 주기.

Table 2. The standard deviation of target acceleration and sampling period of the Kalman filter.

구분	파라미터 값
샘플링 주기	$T = 0.1[\text{sec}]$
RF 탐색기 CA 모델	1.0[m/sec ²]
IIR 탐색기 CV 모델	0.01[m/sec ²]

으로 가정하였으며, 유도탄의 속도, 2차 시스템으로 가정한 자동조종장치, 김발형 탐색기의 특성은 표 1과 같다.

Surface 표적이기 때문에 유도명령은 10 Hertz로 계산하였다. 추적필터 기동가속도 편차와 샘플링 주기는 표 2와 같다.

유도탄의 표적요격 시나리오는 다음과 같다. 초기 표적과 탄의 거리는 2.8[km]이며, 표적 및 탄의 NED 좌표값은 [220][km], [00-0.5][km]이다. 표적의 초기 자세는 방위각이 180°이며 속력은 5[m/sec]이다. 시나리오 시간으로 5초 후에는 0.1[m/sec²]으로 진행방향에 대해 좌측 방향으로 기동하며 시나리오 종료시점까지 수행하도록 하였다. 유도탄의 초기 자세는 표적방향을 향하며, 탐색기에 의해 표적탐지가 된 것으로 간주하여 탐색기 boresight도 표적을 향하고 있는 것으로 가정하였다. RF 탐색기와 IIR 탐색기의 표적탐지거리는 서로 다르지만 추적 및 유도성능을 비교해 보기 위해 동일한 시나리오에서 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션의 구성은 다음과 같다. Case 1.은 RF 센서의 각도 측정잡음을 IIR 탐색기와 동일하게 함으로서 표적추적필터의 구조에 따른 시선각도 및 시선각속도 추정 및 유도성능을 비교해보았다. Case 2.는 표 1에서 주어진 각 센서의 측정잡음을 사용하여 추정 및 유도성능을 살펴보았다. RF 탐색기를 이용한 추적필터의 경우 상태변수가 위치, 속도, 가속도이기 때문에 식 (11), (12), (13)을 이용하여 시선각과 각속도를 계산하여 실제 값과 비교하는데 사용하였다. RMSE의 모든 결과는 100번의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 것이다.

5.1 Case 1

RF/IIR 탐색기가 동일한 각도 측정잡음의 특성을 가질 때 추적필터의 성능분석을 수행한다. 그림 2, 3은 각각 시선각과 시선각속도의 RMSE 결과를 도시한 것이며 전반적으로 추정성능이 좋음을 알 수 있다.

유도탄이 표적에 근접할수록 시선각의 변화가 심하게 변하기 때문에 그림 2의 결과를 보면 마지막 순간에 시선각에 대한 RMSE가 크게 나타난다. 비례항법유도법칙의 경우에서 표적에 탄이 근접함에 따라 t_{go} (time to go)가 매우 작아지게 되며 [18]을 보면 유도명령 계산시 t_{go} 가 분모에 위치함으로 유도명령이 커짐을 알 수 있다. 아래 그림 3에서도 시선각속도가 탄이 표적에 충돌하는 시점에서 급격히 증가하기 때문에 RMSE 오차가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

유도성능의 결과로서 100번의 평균값으로 표적에 대한 탄의 거리오차(miss distance)값을 표 3에 기록하였다.

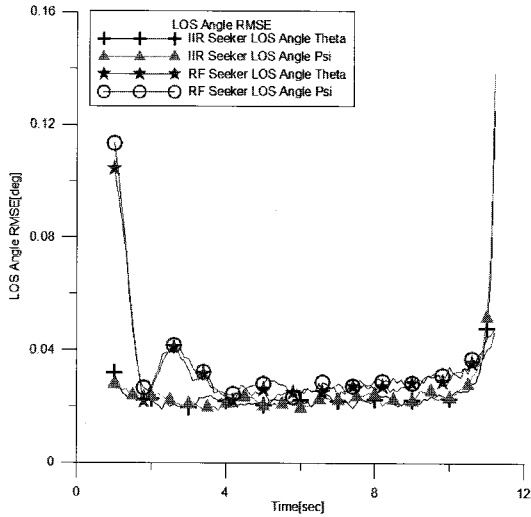


그림 2. 시선각 추정치에 대한 RMSE.
Fig. 2. RMSE of LOS angles estimates.

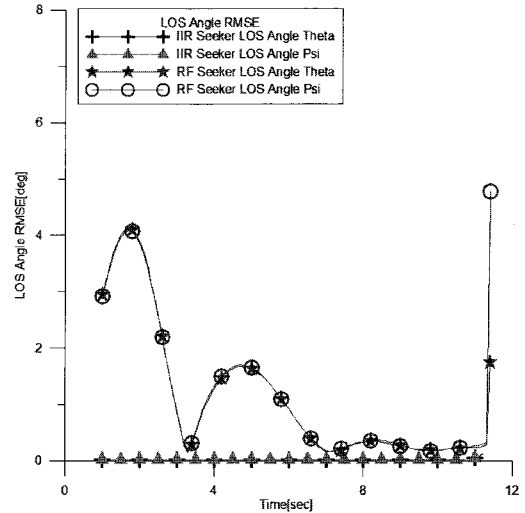


그림 4. 시선각 추정치에 대한 RMSE.
Fig. 4. RMSE of LOS angles estimates.

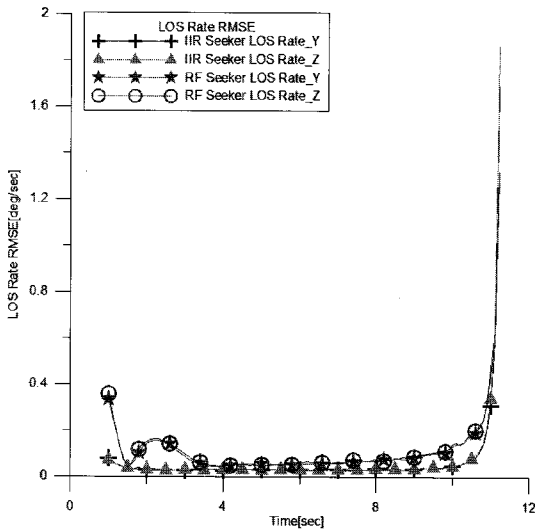


그림 3. 시선각속도 추정치에 대한 RMSE.
Fig. 3. RMSE of LOS rates estimates.

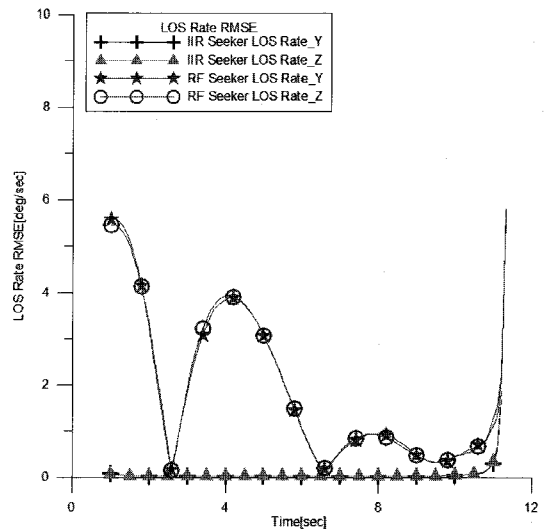


그림 5. 시선각속도 추정치에 대한 RMSE.
Fig. 5. RMSE of LOS rates estimates.

표 3. RF와 IIR 탐색기의 유도성능 비교.

Table 3. Comparison of the guidance accuracy of the RF and IIR seekers.

구 분	거리오차
IIR 탐색기	0.6069[m]
RF 탐색기	0.6522[m]

위 결과로부터 두 탐색기의 경우 유도성능이 모두 우수함을 확인할 수 있다. 특히 IIR 탐색기의 경우 비례항법유도법칙에 의한 유도명령 계산시 접근속도를 계산할 때 유도탄의 속도를 사용하였지만 유도성능에는 큰 영향을 없음을 알 수 있다. 두 유도성능의 차이는 그림 2, 3에 도시된 RMSE 결과에 기인한 것으로 판단된다.

5.2 Case 2

여기서는 RF 탐색기의 각도 측정잡음이 표 1의 값일 경우 추정 및 유도성능을 확인해 보았다. 그림 4, 5를 보면

표 4. RF 탐색기의 유도성능.

Table 4. The guidance accuracy of the RF seeker.

구 분	거리오차
RF 탐색기	0.9511[m]

각도 측정잡음이 8배 이상 커졌기 때문에 상대적으로 추정성능도 IIR 탐색기에 비해 상당히 좋지 않음을 확인할 수 있다. 그림 4의 경우 초반에 오차가 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 5초 이후에는 추정오차가 0.5[deg] 이하로 필터가 수렴하고 있는 특징을 보이고 있다. 표 4를 보면 유도성능의 경우 Case 1보다 1.5배정도 커졌으나 표적이 점이 아니라 어떤 형상을 갖고 있기 때문에 표적 요격에는 성공할 것으로 판단된다.

지금까지는 호밍유도탄의 유도기법으로 비례항법유도법칙을 적용할 경우 각각의 탐색기로부터 측정되는 정보의

형태에 따라 표적추적필터를 설계하고 추정된 표적정보를 이용하여 유도명령을 계산하여 전반적인 표적상태변수 추정 및 유도성능에 대해 살펴보았다. 다음은 이러한 연구결과를 토대로 클러터가 존재하고 두 개의 센서정보를 융합하여 추적필터를 구성하는 방법에 대해 살펴보하고자 한다.

III. 자료결합과 정보융합

본 절에서는 다수의 측정치중에서 필터링의 대상이 되는 표적을 찾아내는 자료결합기법과 적외선 영상탐색기와 초고주파 탐색기와 같은 비영상 센서를 함께 다중으로 사용할 경우 영상-비영상 센서의 측정치를 융합하거나 각 센서의 측정치를 이용하여 표적을 추적하며 이 때 형성되는 트랙정보를 융합하여 표적추적성능을 개선시킬 수 있는 정보융합기법을 연계한 추적필터구조를 제안하고자 한다.

1. 자료 결합 기법

실제 표적추적환경은 구름이나 안개, 해수면이나 지면으로부터 반사되는 신호, ECM/ECCM과 같은 비우호적인 환경에서 이루어진다. 다수의 측정치들중에 실제 표적으로부터 기인한 측정치를 찾아내는 과정인 자료결합기법은 크게 NN (Nearest Neighbor), SN (Strongest Neighbor), PDA (Probabilistic Data Association)계열로 나뉜다.

자료결합에 사용되는 측정치의 개수를 줄임으로써 자료결합에 소요되는 시간을 줄이며 진짜 표적을 찾을 확률을 높이기 위해서는 표적이 있을 만한 위치에 유효측정영역 (VG: Validation Gate)이라 불리는 일정한 크기의 타원체를 설정하여 이 타원체 내부에 존재하는 측정치들만을 표적이 될 수 있는 후보로 간주하고 이들 중에서 진짜 표적을 찾아내게 된다. NN계열은 VG의 중심으로 계산된 예측측정치로부터 표적신호가 멀리 떨어져있지 않을 것이라는 가정으로 표적을 선택하게 되며 다양한 형태로 발전해왔다. 또한 SN계열은 VG내에서 신호의 세기가 가장 큰 것을 표적으로 간주하는 방법으로 이 또한 다양한 형태의 방법들이 소개되어 왔다. PDA계열은 VG내의 모든 측정치들이 표적이 맞을 확률을 계산하여 그 확률을 가중치로 사용하여 모든 측정치를 쇠신추정치를 얻는데 사용함으로써 가장 성능이 우수한 장점을 가지나 계산량이 많은 단점이 있다. 본 논문에서는 PDA의 계열로서 PDA에 신호세기정보를 추가하여 성능을 더욱 향상시킨 PDA-AI (PDA-Amplitude Information)방법[20]과 국내에서 개발되어 PDA-AI와 유사한 추정성능을 갖으며 계산시간을 단축시킨 HPDA (Highest Probability Data Association)[21,22]를 이용하여 RF와 IIR 탐색기에 적용이 가능한 자료결합기법을 제안하고자 한다.

1.1 HPDAF(HPDA filter) 알고리즘

HPDAF는 유효측정영역안의 측정치들을 신호세기가 큰 순으로 정렬하고 order statistics와 거리 정보를 이용하여 각 측정치들의 표적일 확률을 계산하며 이렇게 계산된 확률이 가장 큰 측정치를 선택하여 필터를 쇠신하는 방법으로 알고리즘들은 다음과 같다.

• Prediction step

Standard Kalman filter와 동일

• Update step

상태변수 쇠신 단계에서는 유효측정영역에 측정치가 없는 (M_0)의 경우와 m 개의 측정치가 있는 (\overline{M}_0)의 경우로 나누어 수행된다.

1) M_0 의 경우

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k \quad (20)$$

$$\hat{P}_k = \bar{P}_k + \frac{P_D P_G (1 - C_{\gamma_g})}{1 - P_D P_G} K_k S_k K_k^T \quad (21)$$

$$S_k = H_k \bar{P}_k H_k^T + R_k$$

2) \overline{M}_0 의 경우

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k \beta_l \nu_l \quad (22)$$

$$\bar{P}_k^{M_f} = \bar{P}_k - K_k S_k K_k^T + \alpha K_k S_k K_k^T \quad (23)$$

$$\hat{P}_k = \beta_0 \bar{P}_k^{M_f} + \beta_l (\bar{P}_k - K_k S_k K_k^T) + \beta_l \beta_0 K_k \nu_l \nu_l^T K_k^T$$

식 (22), (23)에서 β_l 은 l 번째 측정치의 표적일 확률로 이 확률이 가장 큰 측정치를 선택하며, β_0 는 표적이 아닐 확률로 $\beta_0 + \beta_l = 1$ 을 만족한다. ν_l 은 l 번째 측정치의 측정잔차이다.

$$\alpha = \frac{(1 - P_D P_G C_{\gamma_g}) \lambda V_G + m P_D P_G C_{\gamma_g} (1 - \gamma(l, m))}{(1 - P_D P_G) \lambda V_G + m P_D P_G (1 - \gamma(l, m))} \quad (24)$$

$$\beta_l = \frac{M(D^l) (1 - f_0^r(a)) f_1(a)}{\left[\begin{array}{l} M(D^l) (1 - f_0^r(a)) f_1(a) \\ + \lambda f_0^r(a) (1 - f_0^r(a)) (1 - P_D P_G) \\ + (l-1) \frac{1}{V_G} P_G (1 - f_0^r(a)) e^{-\frac{a}{1+\rho}} \\ + (m-l) \frac{1}{V_G} P_G \left(P_D - e^{-\frac{a}{1+\rho}} \right) f_0^r(a) \end{array} \right]} \quad (25)$$

여기서,

$$M(D^l) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |S_k|^{1/2}} \exp\left(-\frac{D^l}{2}\right)$$

$$f_0^r(a) = \frac{e^{-a}}{P_{fa}}, \quad f_1(a) = \frac{1}{1+\rho} e^{-\frac{a}{1+\rho}}$$

1.2 PDAF-AI 알고리즘

PDAF-AI는 유효측정영역내에 존재하는 모든 측정치들을 이용하여 가중치를 계산하고 필터를 쇠신하는 방법이다. 여기서 가중치를 계산할 때 거리 정보와 신호세기 정보 모두 사용하며 알고리즘들은 다음과 같다.

• Prediction step

Standard Kalman filter와 동일

• Update step

1) M_0 의 경우

HPDAF와 동일

2) \overline{M}_0 의 경우

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \bar{x}_k + K_k \nu_k \\ \hat{P}_k &= \beta_{k,0} \bar{P}_k + (1 - \beta_{k,0}) \hat{P}_k^j \\ &\quad + K_k \left[\sum_{j=1}^m \beta_{k,j} \nu_{k,j} \nu_{k,j}^T - \nu_k \nu_k^T \right] K_k^T \end{aligned} \quad (26)$$

여기서

$$\nu_k = \sum_{j=1}^m \beta_{k,j} \nu_{k,j}, \quad \hat{P}_k^j = (I - K_k H) \bar{P}_k$$

필터의 확률적 가중치는 다음과 같이 계산된다.

$$\beta_{k,j} = \begin{cases} \frac{N(D_k^j) \rho_{k,j}}{b + \sum_{i=1}^m N(D_k^i) \rho_{k,i}} & j = 1, 2, \dots, m \\ \frac{b}{b + \sum_{i=1}^m N(D_k^i) \rho_{k,i}} & j = 0 \end{cases} \quad (27)$$

여기서, b 와 $\rho_{k,j}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} b &= \lambda(1 - P_D P_G) / P_D \\ \rho_{k,j} &= \frac{f_1(a_{k,j})}{P_D} \frac{P_{fa}}{f_0(a_{k,j})} \end{aligned}$$

2. 정보 융합 기법

다중센서를 이용하여 표적 추적을 하기 위해서는 먼저 각 센서의 특성을 파악하고 특성에 맞는 융합 구조를 설계하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 RF와 IIR 탐색기를 이용한 융합구조를 설계하였으며 먼저 각 센서의 특성에 따른 융합영역은 그림 6과 같다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 IIR, CCD (Charge-Coupled Device)와 같은 영상 탐색기는 RF 탐색기에 비해 탐지거리가 짧다. 이러한 이유 때문에 원거리에서 표적을 추적할 때는 RF 탐색기만을 이용하여 추적하며 표적이 일정 거리에 들어 올 경우 IIR 탐색기와 융합을 통해 추적하게 된다.

2.1 탐색기별 측정치 모델

RF 탐색기의 측정치는 극좌표계 형태로 표시되며, 이러한 극좌표계의 측정치를 이용하여 직교좌표계상에서 추적을 하기 위해서는 일반적으로 비선형 칼만필터(extended Kalman filter)나 측정치 변환 방법을 이용한다[16]. 측정치 변환방법은 측정치와 측정잡음을 직교좌표계 성분으로 선형화시키는 방법으로 비선형 칼만필터에 비하여 이용하여 구조변화가 없고 계산량적인 측면에서도 우수한 성능을 가지고 있어 본 논문에서는 이 방법을 이용하였다. RF탐색기의 측정치 모델은 다음과 같다.

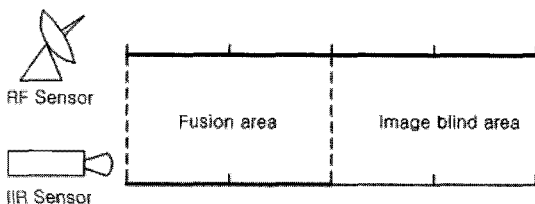


그림 6. RF와 IIR 탐색기의 융합 영역.
Fig. 6. The fusion area of RF and IIR seekers.

$$z^{RF} = h^{RF}(X_S) + v^{RF} \quad (28)$$

여기서 X_S 는 김발좌표계상에서의 표적의 위치를 의미하며 v^{RF} 은 측정잡음으로 평균이 0이고 분산이 σ_{RF}^2 인 가우시안 분포를 가진다. h^{RF} 은 측정방정식으로 다음과 같으며 식 (29)을 이용하여 측정치 변환[16]을 수행하게 된다.

$$h^{RF}(X_S) = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{-z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \end{bmatrix} \quad (29)$$

영상정보인 경우, 표적의 상태변수를 pixel 좌표계에서 표현하는 동력학 모델로 변환하여 사용하는 것이 일반적이다. IIR 탐색기의 측정치는 각도당 픽셀 분해능을 통하여 표적의 각도 정보가 화면상에서 픽셀 위치로 표현되며 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$z^{IIR} = h^{IIR}(X_S) + v^{IIR} \quad (30)$$

여기서 v^{IIR} 은 측정잡음으로 평균이 0이고 분산이 σ_{IIR}^2 인 가우시안 분포를 가진다. h^{IIR} 은 측정방정식으로 다음과 같다.

$$h^{IIR}(X_S) = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \eta \\ \tan^{-1}\left(\frac{-z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \eta \end{bmatrix} \quad (31)$$

여기서, η 는 각도에 대한 픽셀 분해능이다.

식 (31)을 통해 측정된 표적의 픽셀위치를 이용하여 표적을 추적하기 위해서는 의사측정치(pseudo measurement)를 생성하거나 비선형 칼만필터를 이용할 수 있으며 본 논문에서는 다음과 같이 측정방정식 식 (31)를 선형화한 비선형 칼만필터를 사용하였다.

$$H_k^{IIR} = \left. \frac{\partial h^{IIR}(X)}{\partial X} \right|_{X=\bar{x}_k} \quad (32)$$

2.2 Serial fusion 기법

RF와 IIR 탐색기의 추적 가능한 영역이 다르기 때문에 각 탐색기가 독립적으로 운용 가능하며 각 센서의 측정치를 융합센서에서 통합하여 처리할 수 있는 serial fusion기법 [23]을 적용하여 정보융합을 이용한 필터구조를 설계하였으며 그림 7과 같다.

다음 그림 7에서 볼 수 있듯이 표적이 fusion area에 존재하지 않을 경우 RF 탐색기만 이용하여 표적 추적이 이루어지며 표적이 fusion area에 존재하게 되면 IIR 탐색기의 측정치를 이용하여 추적이 가능한 구조로 설계하였다. 또한 IIR 탐색기를 이용하여 표적을 추적할 경우 예측치를 RF 탐색기에서 추정된 추정치를 이용한다는 특징을 갖는다. IIR 추적 알고리즘에서는 식 (31)의 h^{IIR} 를 이용하여 예측치를 IIR 탐색기 화면의 좌표로 표현하고 자료결합에 필요한 Kalman gain과 innovation covariance는 식 (32)의 H_k^{IIR} 를

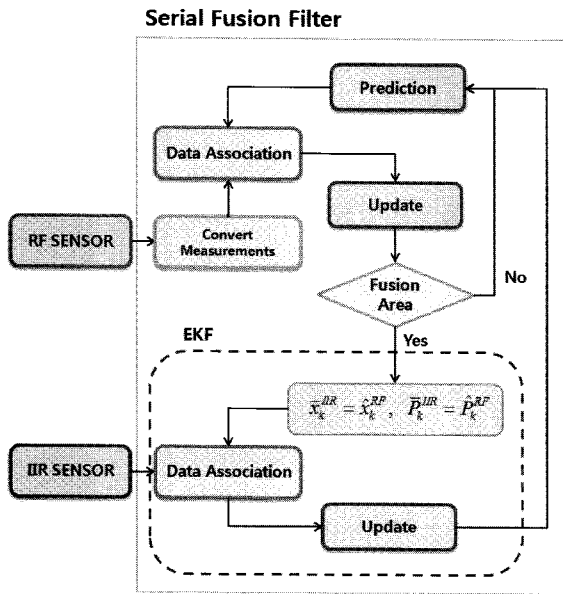


그림 7. RF/IIR 탐색기를 이용한 Serial Fusion 기법.
Fig. 7. The serial fusion structure using the RF / IIR seekers.

사용하여 계산한다. 최종적으로 자료결합 및 필터쇄신을 통해 얻어진 추정치는 유도기법에 사용되는 유도탄에 대한 표적의 상대위치/속도정보로 이용된다.

IV. 시뮬레이션

클러스터가 존재하는 환경에서 자료결합, 정보융합을 연계한 추적필터와 추정된 표적의 상태변수를 이용하여 유도탄을 표적으로 호밍하는 시나리오에서 표적 추정 및 유도성능에 대한 분석을 수행하였다. NED 좌표계상에서 surface 표적의 위치는 $[-350] [km]$, 초기 방위각 270° 방향으로 $5 [m/sec]$ 의 속력으로 진행하다 시나리오 시간 5초부터 30초 동안 $0.1 [m/sec^2]$ 로 좌측방향으로 기동을 한다. 유도탄은 초기 원점에서 고도 $0.1 [km]$ 에 위치하고, 초기 자세로서 비행경로각(flight path angle)은 0° , 방위각은 75° 이며, 앞의 시나리오보다는 유도탄의 속력을 더 빠르게 하여, $350 [m/sec]$ 로 하였다. 유도탄의 호밍유도기법은 비례항법 유도법칙으로서 식 (16)과 동일한 방법으로 유도명령을 계산하였다.

IIR 탐색기는 탐지거리가 $2 [km]$ 이며, 측정잡음의 편차는 각 축으로 $1.5 [pixel]$ 로 두었다, IIR 탐색기의 크기는 가로/세로가 $640 \times 480 [pixel]$ 로 각도로 나타내면 $24^\circ \times 18^\circ$ 이다. 표적의 신호를 모델링하기 위하여 탐지 확률(P_D)은 0.9로 두고, 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR)는 12로 두었다. 클러스터는 화면 내에서 30개씩 uniform분포 하도록 생성하였다. RF 탐색기는 탐지거리가 $10 [km]$ 이며, 측정잡음의 편차는 거리 $5 [m]$, 고각, 방위각은 0.5° 로 하였다. SNR은 10으로 두었고, 탐지확률은 0.9, 클러스터의 밀도(λ)는 0.1×10^{-5} 로 두었다.

필터의 동역학 모델은 등가속도 모델이며, 공정잡음의 기동가속도 편차는 $1 [m/sec^2]$ 로 두었으며, Monte-Carlo 시뮬레이션은 100회 수행하였다.

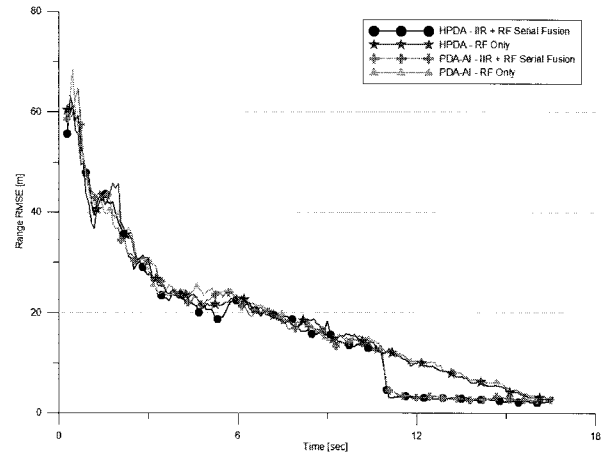


그림 8. 위치에 대한 RMSE.
Fig. 8. RMSE of target position estimates.

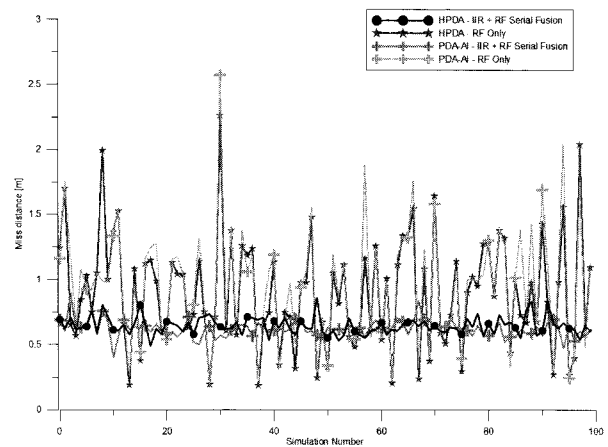


그림 9. 유도탄과 표적의 유도오차.
Fig. 9. The miss distance of the missile and target.

표 5. RF와 RF/IIR 탐색기에 대한 유도성능 비교.

Table 5. Comparison of the guidance accuracy of the RF and RF/IIR seekers.

구분	HPDAF	PDAF-AI
RF Only	0.930947[m]	0.952783[m]
IIR & RF	0.644658[m]	0.621126[m]

그림 8은 표적추적 및 유도를 RF 탐색기만 이용하였을 경우와 RF/IIR 탐색기를 모두 이용하였을 때의 위치에 대한 RMSE 결과로서 RF/IIR 탐색기의 정보융합을 통해 표적 추정성능이 향상됨을 알 수 있다. 시뮬레이션시간 12초 전에 IIR 탐색기에 의해 표적탐지가 시작되어 정보융합이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

표 5와 그림 9는 Monte-Carlo 시뮬레이션 수행횟수에 따른 유도성능을 분석한 결과로서, RF/IIR 탐색기의 정보융합을 통해 유도성능이 향상됨을 알 수 있다. 또한 그림 9를 보면 Monte-Carlo 시뮬레이션의 수행에 따라 miss distance가 RF 탐색기만을 사용했을 경우에는 RF/IIR 탐색기의 정보융합을 이용한 경우보다 상대적으로 크게 spiky한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 5에서 두 탐색기의 정보융합을 통한 유도성능 결과는 표적 탐지확률이 0.9이기 때문에 표 3의 단일 탐색기 시뮬레이션 환경과는 달리 매 스캔마다 표적의 측정치가 존재하지 않을 수 있고, 또한 클러터를 포함하고 있는 표적추적 환경이기 때문에 정보융합을 통한 유도성능 개선효과를 비교하기 위해서는 표 5에서 제시한대로 동일한 환경에서 단일 탐색기와 두 개의 탐색기 정보를 융합했을 경우의 유도성능 비교를 통해 정보융합을 통한 표적 추적 및 유도성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

다음은 본 논문에서 제시한 자료결합기법인 HPDAF와 PDAF-AI의 트랙유지성능 및 연산시간에 대한 분석결과이다. 앞의 그림 8, 9에서 두 자료결합의 추정성능에 대해서는 유사한 특성을 확인하였으며, 다양한 클러터 밀도와 탐지확률에 대해서도 두 자료결합기법의 트랙유지 성능을 분석함으로써 제안한 HPDAF의 성능을 PDAF-AI와 비교해 보고자 한다. 아래의 표 6은 RF 탐색기의 탐지 확률과 클러터 밀도에 따른 트랙유지성능을 나타낸 것으로서 HPDAF와 PDAF-AI가 유사한 트랙유지성능을 보여주고 있다. Track loss의 판단 기준은 추적오차가 500[m] 이상일 경우로 가정하였다. 표 7은 연산시간을 비교한 결과로서 Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU 2.4GHz의 PC에서 측정하였다. 연산시간 측면에서 HPDAF가 PDAF-AI보다 우수한 것으로 나타났다.

표 6. HPDAF와 PDAF-AI의 Track Loss Rate(%) 비교.
Table 6. Comparison of the track loss rate(%) of the HPDAF and PDAF-AI.

PD	λ	HPDAF	PDAF-AI
0.7	0.000001	0	2
	0.000003	2	3
	0.000005	3	4
	0.000007	3	3
	0.00001	3	2
0.8	0.000001	0	0
	0.000003	1	2
	0.000005	1	0
	0.000007	4	3
	0.00001	3	3
0.9	0.000001	0	0
	0.000003	1	1
	0.000005	1	1
	0.000007	0	0
	0.00001	0	3

표 7. 자료결합기법별 알고리즘 평균 수행시간 비교.
Table 7. Comparison of the average computation time of the HPDAF and PDAF-AI.

	HPDAF	PDAF-AI
평균 수행 시간(msec)	0.028739	0.042049

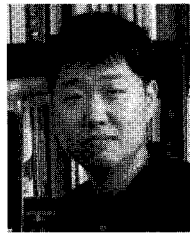
V. 결론

본 논문에서는 영상/비영상 탐색기를 장착한 유도탄의 호밍단계에서 적용 가능한 MTG (Multimode Tracking and Guidance) 시스템을 제안하였다. MTG 시스템을 설계하기에 앞서 영상/비영상 탐색기 각각이 갖는 측정치의 형태에 따라 단일 탐색기일 경우 비례항법유도명령을 계산하기 위해 필요한 유도변수를 추정할 수 있는 칼만필터를 제안하고 3차원 공간상에서 시선각 및 각속도 추정과 유도 성능을 분석하였다. 단일 탐색기의 분석 결과를 토대로 비우호적인 전장 환경에서 표적의 트랙유지 성능을 향상시키고, 표적 추정성능을 향상시키기 위해 자료결합과 정보융합을 연계한 추적필터를 설계하였다. 시뮬레이션을 통하여 성능을 분석한 결과 기존에 가장 우수한 방법으로 알려진 자료결합방식(PDAF-AI)보다 연산시간이 적게 소요되고 트랙유지 및 표적추정성능이 유사함을 확인하였으며, 정보융합을 결합함으로써 표적의 상태 추정 및 유도성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 MTG 알고리즘은 단일 탐색기를 장착한 유도탄의 탐지거리 및 표적추적정확도 향상을 통해 기후의 영향을 받지 않고 전천후용으로 표적에 대한 호밍 성능을 향상시킬 것으로 생각되며, 비례항법유도법칙 뿐 아니라 표적에 대한 충돌각(impact angle)을 제어함으로써 표적의 취약부를 정밀 타격할 수 있는 최적제어유도법칙에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] I.-J. Ha, J.-S. Hur, M.-S. Ko, and T.-L. Song, "Performance analysis of PNG laws for randomly maneuvering targets," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 26, Issue 5, pp. 713-721, Sep. 1990.
- [2] S.-H. Song and I.-J. Ha, "A Lyapunov-like approach to performance analysis of 3-dimensional pure PNG laws," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 238-248, Jan. 1994.
- [3] J.-H. Oh and I.-J. Ha, "Capturability of the 3-dimensional pure PNG law," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 35, Issue 2, pp. 491-503, Apr. 1999.
- [4] T. L. Song and T. Y. Um, "Practical guidance for homing missiles with bearings-only measurements," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 32, no. 1, pp. 434-443, Jan. 1996.
- [5] T. L. Song, "Target adaptive guidance for passive homing missiles," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 33, Issue 1, pp. 312-316, Jan. 1997.
- [6] D.-Y. Rew, M.-J. Tahk, and H. J. Cho, "Short-time stability of proportional navigation guidance loop," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 1107-1115, July 1996.
- [7] X. Rong Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. Part I. Dynamic models," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 39, no. 4, pp. 1333-1364, Oct. 2003.

- [8] X. Rong Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking: decision-based methods," *Proc. of SPIE*, vol. 4728, Apr. 2003.
- [9] X. Rong Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. Part V. Multiple-model methods," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 41, no. 4, pp. 1255-1321, Oct. 2005.
- [10] T. L. Song, J. Y. Ahn, and T. Y. Um, "A passive tracking filter for missile capture," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 26, no. 5, pp. 867-875, Sep. 1990.
- [11] T. L. Song, "Observability of target tracking with bearings-only measurements," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 1468-1472, Oct. 1996.
- [12] Yaakov Bar-Shalom, *Tracking and Data Association*, Academic Press Professional, Inc., 1987.
- [13] C.-F. Lin, *Modern Navigation, Guidance, And Control Processing*, Prentice Hall, Inc., 1991.
- [14] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *J. Basic Eng. ASME*, vol. 82D, pp. 35-45, 1960.
- [15] Peter H. Zipfel, *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics*, AIAA, Inc., 2000.
- [16] Lerro, D., Bar-Shalom, Y., "Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1015-1022, July 1993.
- [17] S. S. Blackman, *Multiple Target Tracking with Radar Applications*, Artech House, 1986.
- [18] Paul Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance 4th Edition*, AIAA, Inc., 2002.
- [19] S.-A. Jang, C.-K. Ryoo, K.-Y. Choi, and M.-J. Tahk, "Guidance algorithms for tactical missiles with strapdown seeker," *Proc. SICE Annual Conf.*, pp. 2616-2619, Aug. 2008.
- [20] Thiagalingam Kirubarajan, Yaakov Bar-Shalom, "Probabilistic Data Association Techniques for Target Tracking in Clutter," *Proc. of the IEEE*, vol. 32, no. 3, pp. 536-557 March 2004.
- [21] T. L. Song and D. S. Kim, "Highest probability data association for active sonar tracking," *Proc. of Information Fusion, 2006 9th International Conf.*, pp. 1-8, July 2006.
- [22] T. L. Song, "Most probable data association with distance and amplitude information for target tracking in clutter," *Proc. of IEEE International Conf., MFI 2008*, pp. 360-365, Aug. 2008.
- [23] Houles, A, Bar-Shalom, Y., "Multisensor tracking of a maneuvering target in clutter," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 176-189, March 1989.



한 두 희

2000년 한양대 전자전기제어계측공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전자전기 제어계측공학과 졸업(석사). 2005년~현재 동 대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 유도 및 자동조종장치 설계, 사격통제시스템.



김 형 원

2006년 한양대 컴퓨터공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 추적필터링, 자료결합, 정보융합.



송 택 렬

1974년 서울대 공학사. 1981년 Univ. of Texas at Austin 대학원 항공우주공학과 졸업(석사). 1983년 Univ. of Texas at Austin 대학원 항공우주공학과 졸업(박사). 1974년~1995년 국방과학연구소. 1995년~현재 한양대 전자정보시스템공학과 교수. 연구관심분야는 표적추적시스템, 자료결합 및 정보융합, 유도 및 제어.